

АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОП NT-206: НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ

А. А. Суслов¹, В. В. Чикунов^{1,2}, Д. И. Шашолко¹, С. А. Чижик^{1,2}

¹ОДО «Микротестмашины», Гомель, Беларусь. E-mail: microtm@narod.ru

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Атомно-силовой микроскоп (АСМ) NT-206 (рис. 1) в комплексе с управляющим программным обеспечением SurfaceScan и средствами обработки АСМ-изображений SurfaceView [1] предназначен для измерения и анализа микро- и субмикрорельефа поверхностей, объектов микро- и нанометрового размерного диапазона с высоким разрешением. Области применения АСМ – физика твердого тела, тонкопленочные технологии, нанотехнологии, микро- и нанотрибология, микроэлектроника, оптика, испытательные системы прецизионной механики, магнитной записи, вакуумной техники и др. АСМ NT-206 предназначен для использования в научных и промышленных лабораториях, преимущественно специализирован для характеристики физико-механических свойств материалов на микро- и наноуровне [2]



Рис. 1. Общий вид атомно-силового микроскопа NT-206 в базовой конфигурации: блок сканирования с блоком электроники управления

В приборе применена измерительная схема с неподвижным зондом над подвижным образцом (рис. 2). В ходе измерений прецизионные перемещения образца обеспечиваются трубчатым пьезосканером, на котором образец и устанавливается. В измерительной системе использована лазерно-лучевая схема детектирования отклонения кантилевера. В качестве зондов применяются промышленно изготавливаемые чипы размерами 3,4*1,6 мм (например, производства Mikromasch) [3]. При этом для обеспечения удобства установки и смены зондов разработан сменный держатель.

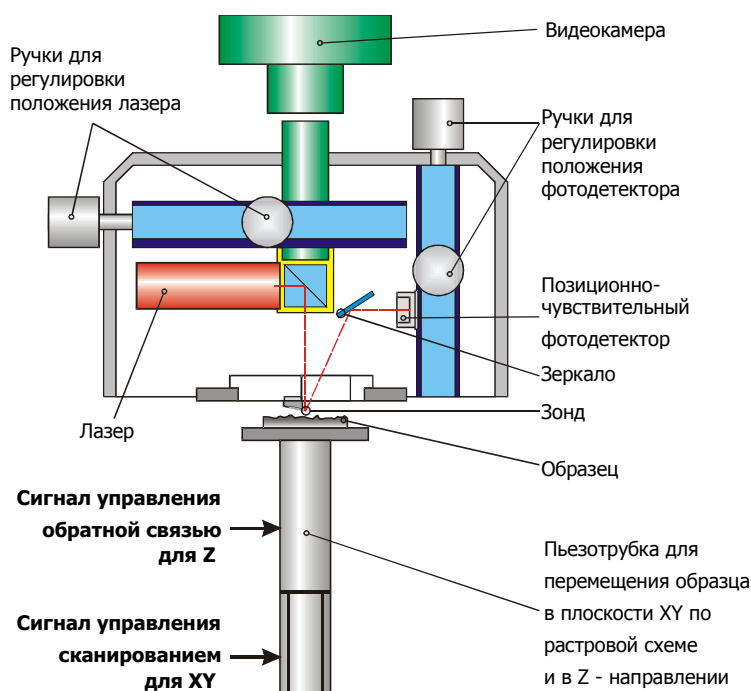


Рис. 2. Структурная схема организации сканирования и детектирования положения зонда АСМ NT-206

Перед измерениями зонд может быть перемещен в необходимую область над образцом при помощи автоматизированной платформы (в диапазоне 10 мм в плоскости XY). Для обеспечения обзора области сканирования и объектов, над которыми находится зонд, в приборе применена видеокамера, позволяющая в реальном масштабе времени наблюдать за перемещениями зонда над поверхностью. Видеокамера обеспечивает визуализацию области размером 1*0,75 мм при размере картинки на мониторе 640*480 пикселей и частоте смены кадров 25–30 кадр/с. Видеосистема и платформа автоматизированного перемещения зонда над образцом включены в базовую комплектацию прибора (встроены по умолчанию). Сочетание этих двух опций позволяет достаточно гибко выбирать на поверхности области (объекты) для сканирования при непосредственном визуальном контроле оператора. Механическая система прибора изначально создавалась с учетом наличия этих опций, что потребовало разработки таких компонентов, как интегрированная оптическая система (в сотрудничестве с УП «ЛЭМТ»), специализированный механизм позиционирования лазера, моторизованная платформа.

В настоящее время разработана и испытывается дополнительная оснастка –

термокамера для образца, которая позволяет производить измерения при повышенных температурах (порядка 150 °С). Управляющая система позволяет при этом задавать как фиксированную температуру (термостатирование), так и определять режим нагрева.

Ниже подробнее описаны уникальные функции, реализованные в АСМ NT-206. Данные функции разрабатываются и проходят испытание совместно с лабораторией нанопроцессов и технологий ИТМО НАНБ.

Динамическая силовая спектроскопия

Динамическая силовая спектроскопия является специальной функцией АСМ NT-206, позволяющей визуализировать зависимость одновременно трех параметров: амплитуды, частоты, расстояния между зондом и образцом. Подобное сочетание дает возможность комплексно характеризовать взаимодействие зонда (в динамическом режиме) и измеряемой поверхности (рис. 3).

В окне визуализации отображаются два двухмерных изображения:

- *AFD* – амплитуда колебаний кантилевера как функция частоты колебаний и расстояния *Distance* между поверхностью образца и зондом;
- *PhFD* – сдвиг фазы колебаний кантилевера как функция частоты колебаний и расстояния *Distance* между поверхностью образца и зондом.

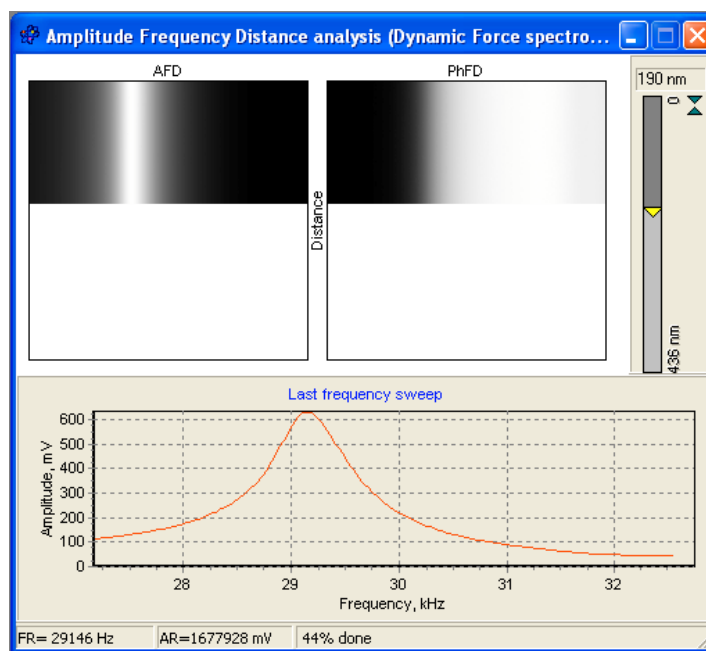


Рис. 3. Окно визуализации данных динамической силовой спектроскопии

В окне визуализации система также регистрирует кривую зависимости амплитуды колебаний кантилевера от частоты, полученную при последнем сканировании частотного диапазона (соответственно на предшествующем текущему шаге по вертикали между образцом и зондом). Измеренные данные можно дополнительно проанализировать в программе SurfaceView.

Многослойное сканирование (Multilayer scanning)

Многослойное сканирование – это специализированная методика автоматизированного получения набора АСМ-изображений для одной и той же области на поверхности образца при различных значениях параметра Set-point. Каждый скан, полученный при одном значении параметра Set-point, интерпретируется как слой. Изменение параметра Set-point при переходе от одного скана к другому означает, что система изменяет силу прижатия острия зонда к исследуемой поверхности. Данная методика при соответствующей математической обработке измеренных результатов может рассматриваться как томография поверхностных слоев [4].

Данные, измеряемые многослойным сканированием, визуализируются в специализированном окне (рис. 4). В нем отображается процесс получения либо одного слоя, либо всех слоев одного за другим по мере их измерения прибором (при активированной опции *Show layers alternately*). Дополнительно выводится цветовая шкала высот и информация о параметрах производимого сканирования, а также обеспечивается возможность настройки некоторых вспомогательных функций визуализации.

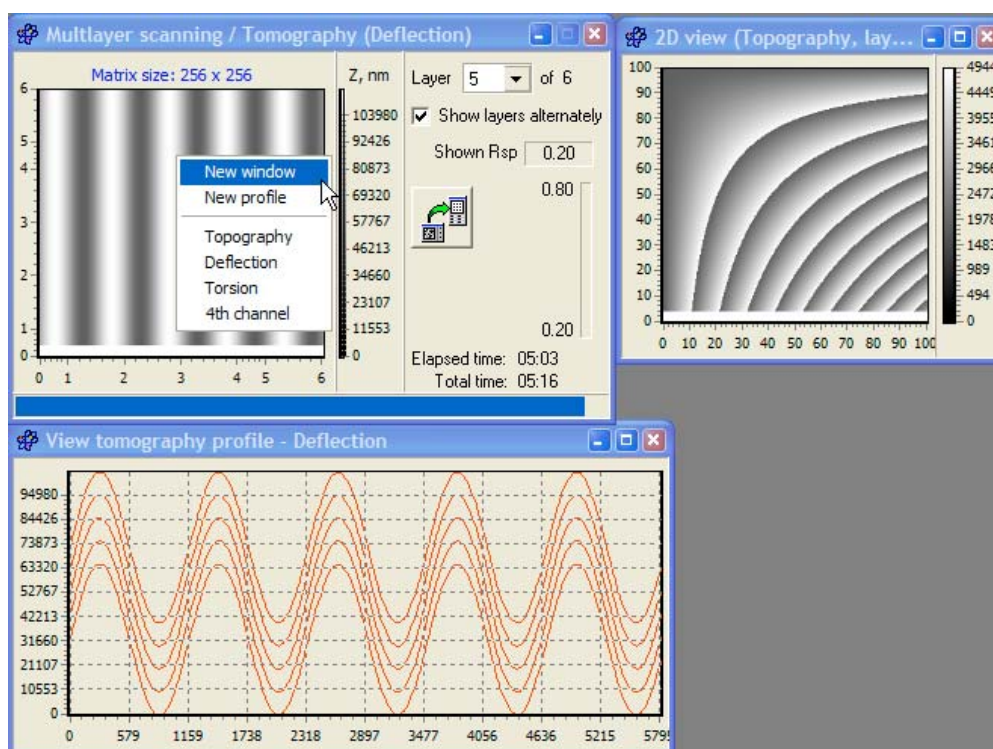


Рис. 4. Окна визуализации АСМ-данных при многослойном сканировании, открытые дочерние окна и контекстное меню

Селектор слоев *Layer* определяет, какой слой из всего измеряемого набора будет отображаться в окне визуализации при отключенной опции *Show layers alternately*. Общее количество слоев выводится за селектором. Опция *Show layers alternately* включает режим отображения в зоне визуализации всех слоев поочередно (одного за другим по мере их измерения). Селектор *Layer* при этом будет информировать о номере текущего измеряемого слоя. Значение *Shown Rsp* пока-

зывает параметр *set-point*, соответствующий текущему визуализируемому слою. Вертикальный индикатор под значением *Shown Rsp* в графической форме представляет изменения параметра *set-point* от верхнего значения до нижнего. В окне также представляется информация о времени, прошедшем после начала данной процедуры сканирования (*Elapsed time*) и расчетное время, необходимое для выполнения текущей процедуры (*Total time*).

Тип данных, отображаемый в окне, может быть выбран в контекстном меню. Контекстное меню также содержит команды для открытия нового окна визуализации (например, для отображения другого типа измеряемых данных) и/или окна для визуализации набора профилей, измеренных вдоль текущей линии быстрого сканирования во всех слоях.

Анализ и визуализация набора данных, полученного при многослойном сканировании, осуществляется при помощи специализированной функции программы *SurfaceView*. После загрузки всех слоев структуры и указания параметров совмещения этих слоев (модуль Юнга точки, наименее подверженной деформированию, жесткость кантилевера, амплитуда свободных колебаний и радиус закругления острия зонда) будет выведено окно анализа (рис. 5).

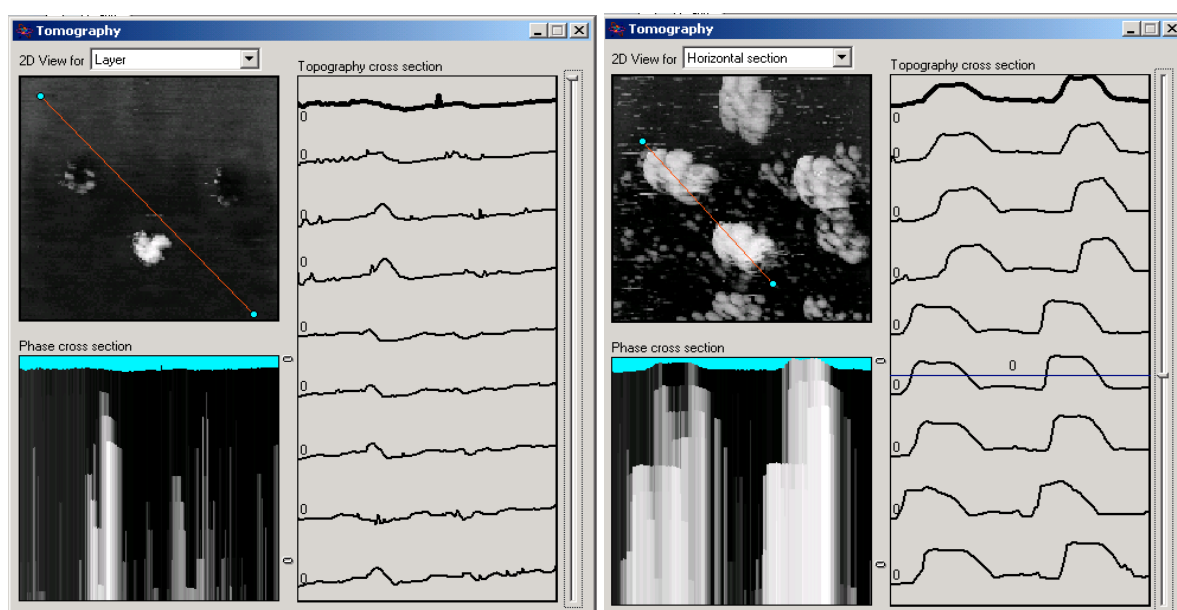


Рис. 5. Окно анализа многослойных структур в режиме просмотра по слоям (слева) и просмотра горизонтального сечения (справа)

В режиме просмотра по слоям в окне 2D изображения визуализируется топография текущего слоя, а в режиме просмотра горизонтального сечения также имеется возможность просмотра горизонтального сечения на разных глубинах (рис. 5). В этом окне можно устанавливать сечение, в соответствии с которым будет показано сечение топографии по всем слоям и сформировано изображение сечения фазового контраста по всем слоям. При этом на изображении сечения фазового контраста можно увидеть структуры, расположенные на глубине (рис. 6).

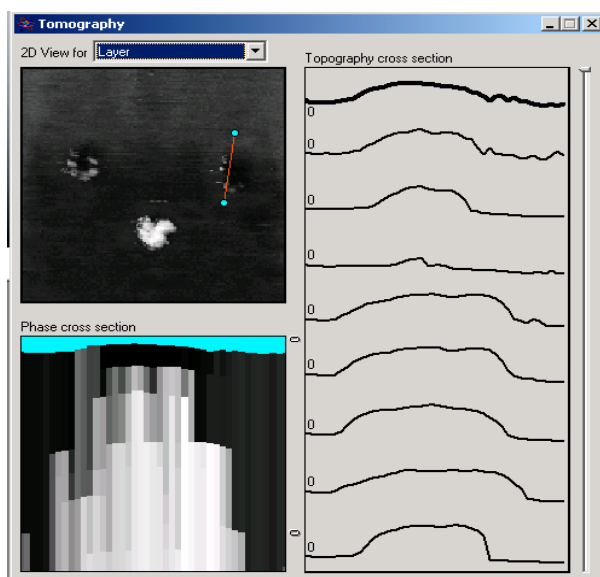


Рис. 6. Пример отображения на сечении фазового контраста структуры, расположенной на глубине (под поверхностью)

Микротрибометрия

В дополнение к широко известному режиму латерально-силовой микроскопии (микроскопии сил трения) в АСМ NT-206 имеется уникальная опция микротрибометрии [5]. Для ее реализации вместо штатного держателя зонда устанавливается другой – специализированный держатель с камертонным осциллятором (рис. 7). При этом все электрические цепи остаются практически без изменений. Камертонный осциллятор обеспечивает микродвижение индентора параллельно поверхности образца (подобно методике *shear force*) и одновременно играет роль сенсора. Подобный подход позволяет осуществлять многоцикловое трение с реальными скоростями, а также оценивать износ испытываемого материала *in situ*.

Основная идея, использованная при реализации данной опции, заключается в оценке динамических характеристик колебательной системы, осциллирующей на резонансной частоте. Эти характеристики дают информацию о нормальных и латеральных силах, действующих на колеблющийся индентор, а также о диссипации энергии при трении индентора по поверхности образца.

На рис. 8 представлены результаты экспериментальных измерений, проведенных с помощью опции микротрибометрии. Как показывает анализ, полученные данные корректно представляют поведение материалов при различных нагрузках. Кроме того, полученные зависимости позволяют определить точку, при которой происходит разрушение фрикционного контакта при многоцикловом трении.

Насколько известно, измерение сил трения на микро- и наноуровне с характеристикой механизма трения является беспрецедентной задачей. Полученные с помощью опции осциллирующей микротрибометрии данные позволяют реализовать скорости трения, намного выше, чем при измерениях с помощью АСМ-зондов в режиме латерально-силовой микроскопии. Кроме того, масштабный

фактор микротрибометрических измерений значительно ближе к тому уровню, который существует в реальных инженерных задачах. В этой связи микротрибометрия с помощью камертонного осциллятора имеет большой потенциал для микро- и нанотрибологии, в том числе для разработки экспресс-методик оценки трибологических характеристик материалов.

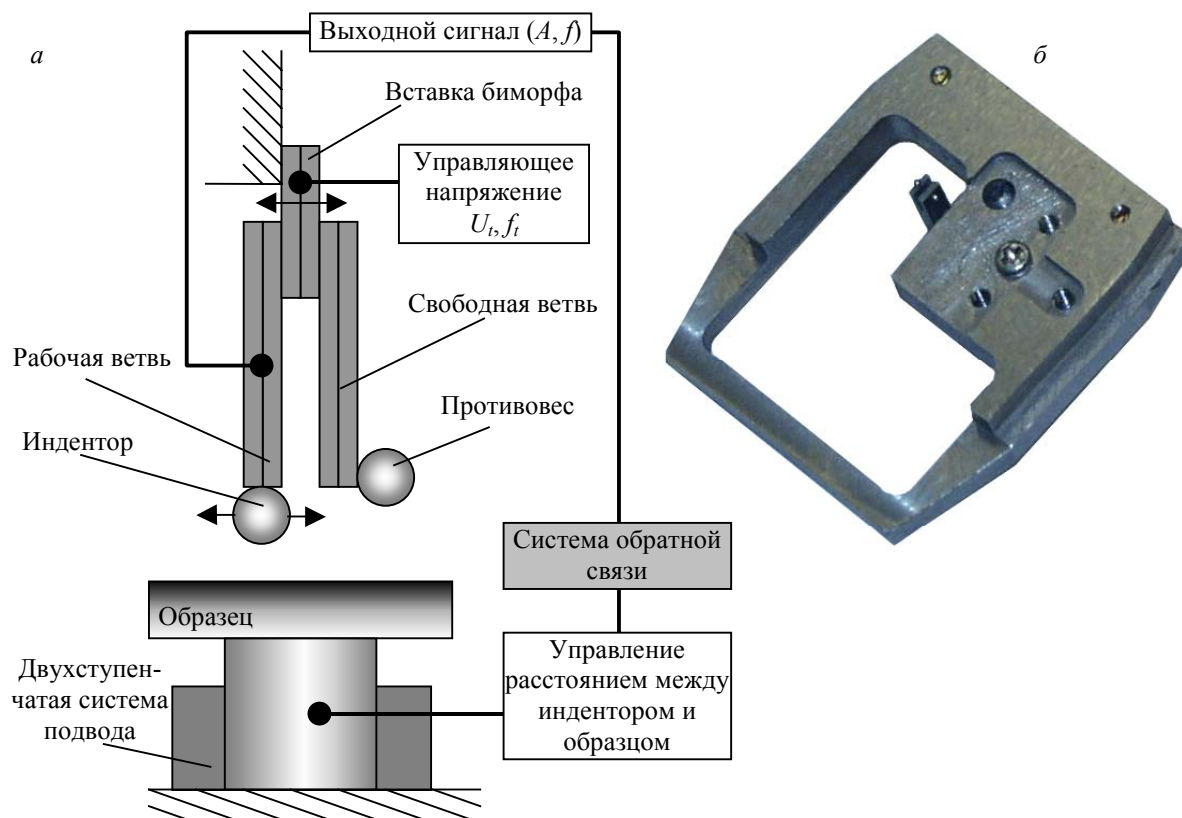


Рис. 7. Схема совместной измерительной системы микротрибометр–АСМ (а) и внешний вид сменного держателя АСМ NT-206 с установленным камертонным осциллятором (б)

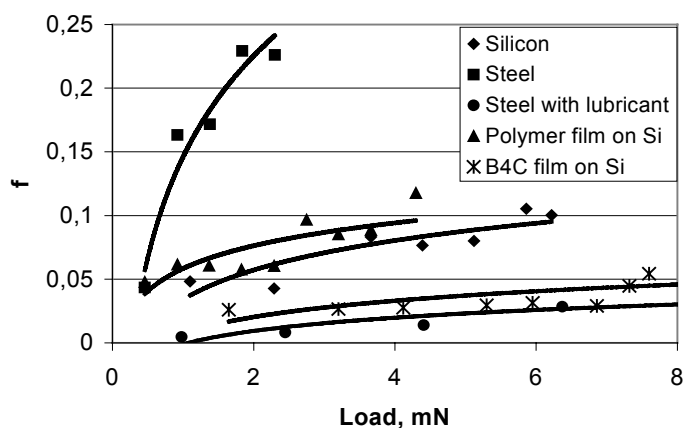


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения от нагрузки для испытуемых материалов при измерениях с помощью опции микротрибометрии

Следует отметить, что измерения на нанометровом масштабном уровне с использованием сканирующего зондового микроскопа (СЗМ) с максимальным набором функций пока не являются тривиальными и требуют реализации достаточно сложных функций калибровки, исключения возможных артефактов в изображениях и интерпретации результатов.

Несмотря на интенсивное развитие СЗМ, возможности метода еще далеко не исчерпаны. Во многих задачах наноматериаловедения метод СЗМ не имеет равноценных альтернатив, хотя его метрологическое обеспечение пока имеет ограничения, в особенности применительно к нанокompозитам.

Литература

1. <http://microtm.narod.ru>.
2. Чижик С. А. Комплексная характеристика материалов методом сканирующей зондовой микроскопии // Тепло- и массоперенос-2003: Сборник научных трудов. Мн.: ИТМО им. А.В, Лыкова НАН Б, 2003. С. 226-232.
3. <http://www.spmtips.com>.
4. Chizhik S.A., Shasholko D.I., Chikunov V.V. Nanotomography for surface layers by SPM // Proc. Int. Workshop «Scanning Probe Microscopy – 2003». Nizhny Novgorod. 2003. March 2-5. P. 46-48.
5. Chizhik S. A., Ahn H.-S., Chikunov V. V., Suslov A. A. Tuning fork energy dissipation nanotribometry as option of AFM // Proc. Int. Workshop «Scanning Probe Microscopy – 2004». Nizhny Novgorod. 2004. May 2-6. P. 119-121.